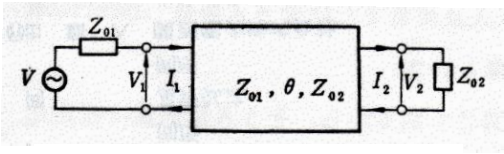
２００８年７月　ＡＶケーブルテクノロジーズ　根岸邦夫

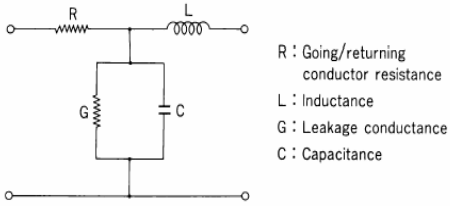
挿入伝送量；
異なったインピーダンスを持つ機器間に配線されたケーブルの伝送特性解析

１．一般的な伝送特性記述方法；特性インピーダンス（影像インピーダンス)、伝播定数

一般的な伝送路の記述は「図１」の影像インピーダンスの定義のように記述される。



「図１」影像伝送量の定義

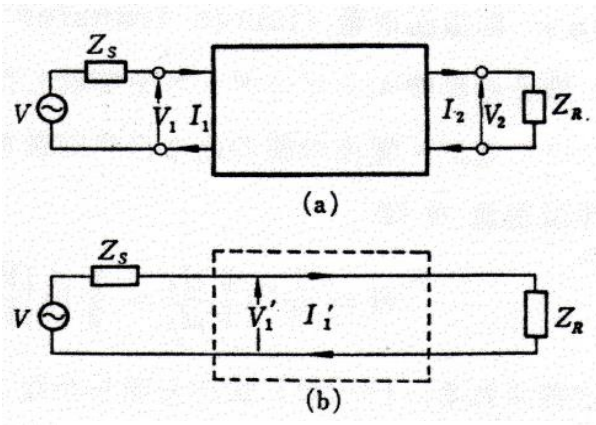


「図２」ケーブルの電気的等価回路

ケーブルの場合には電気的等価回路は「図２」の如くであり、$Z_{01}=Z_{02}=Z_0$であるので、
両端末のインピーダンスがケーブルの特性インピーダンス；Z_0で終端された場合の伝送特性として、減衰量、位相定数といった２次定数が求められ、ケーブル選択の際の比較データーとなる。
例えば、ＴＶ等の伝送機器では入出力のインピーダンスは７５Ωであり、ケーブルもZ_0＝７５Ωのものが使用される。使用長により減衰量を満足するケーブルサイズが選ばれる事になる。

２．異なったインピーダンスを持つ機器間に配線されたケーブルの伝送特性

例えばケーブルがオーディオ機器間に使用される、アナログオーディオケーブル、スピーカーケーブルのような場合には、挿入伝送量を計算することでケーブルの伝送特性；減衰量（αi)、位相定数（βi）を求めることが出来る。



「図３」挿入伝送量の定義

挿入伝送量とは「図３」（ｂ）の如く、２つの機器間を直接つないだ時の電力量に対して、「図３」（ａ）の如く、間にケーブルを挿入した場合の負荷（Z_R）に伝送される電力量の比として。式（１）の如く定義される。
式（１）をインピーダンス（複素数）で表すと式（２）となるが、ケーブルの場合には回路は対象であるから$Z_{01}=Z_{02}$となる。

$$\Theta_i = \frac{1}{2}\ln\frac{V_1'I_1'}{V_2I_2} = \alpha_i + j\beta_i \qquad \cdots(1)$$

$$\Theta_i = \ln\left[\frac{2\sqrt{Z_SZ_R}}{Z_S+Z_R}\cdot\frac{Z_S+Z_{01}}{2\sqrt{Z_SZ_{01}}}\cdot\frac{Z_R+Z_{02}}{2\sqrt{Z_RZ_{02}}}\cdot e^{\theta}\left\{1-\frac{Z_S-Z_{01}}{Z_S+Z_{01}}\cdot\frac{Z_R-Z_{01}}{Z_R+Z_{01}}e^{-2\theta}\right\}\right] \qquad \cdots(2)$$

３．スピーカーケーブルへの挿入伝送理論の適用検討

アンプ～スピーカーケーブル～スピーカーシステムの系に挿入伝送理論を展開してみよう。この系では「図３」のＺｓはパワーアンプの出力インピーダンスである。アンプの仕様に明記されていればその値を計算に使用出来るが、記載されていないことが多い。しかし、オーディオアンプの取扱説明書には必ずダンピングファクター（ＤＦ）が記載されているので、ここからうかがい知る事が出来る。因みに、私の使用しているアンプには次のように記載されている；　ＤＦ＝１００（８Ω　２０～２０ｋＨｚ）

ＤＦの定義から、８Ωのスピーカーを「図３」（ｂ）の如くアンプに直接つないだ時、Ｚｓは８Ωの１／１００の８０ｍΩであることが分かる。故に、Ｚｓ＝Ｚａｍｐ＝８０ｍΩ　として計算してみる。

スピーカーシステムのインピーダンスは４Ω、６Ω、８Ωと言ったものが多く使われているが、ここで言われるインピーダンスは周波数帯の中で最低のインピーダンスであり、一般には複雑な周波数特性を示す。８Ωのフルレンジスピーカーのデーターが入手出来たので、Ｚｒ＝Ｚｓｐ＝（フルレンジスピーカーデーター）としてこれを使用してみる。

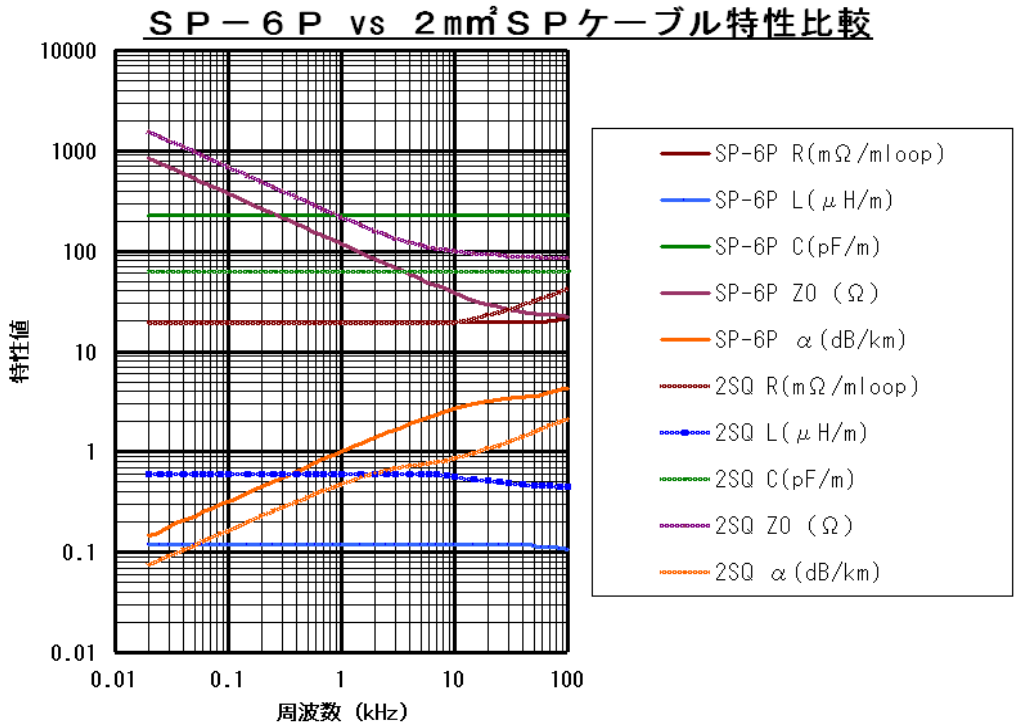
挿入減衰量（α ｉ）の比較をするケーブルとしては；

① ＡＶＣＴ　ＳＰ－６Ｐ；０．３ｍｍ^{2}の赤ｘ白の６対ケーブル（仕様詳細はＨＰ参照）

② ＳＰ－６Ｐと導体断面積のほぼ等しい２ｍｍ^{2}のポリエチレン絶縁２心ケーブル

１）ケーブルの基本特性の差

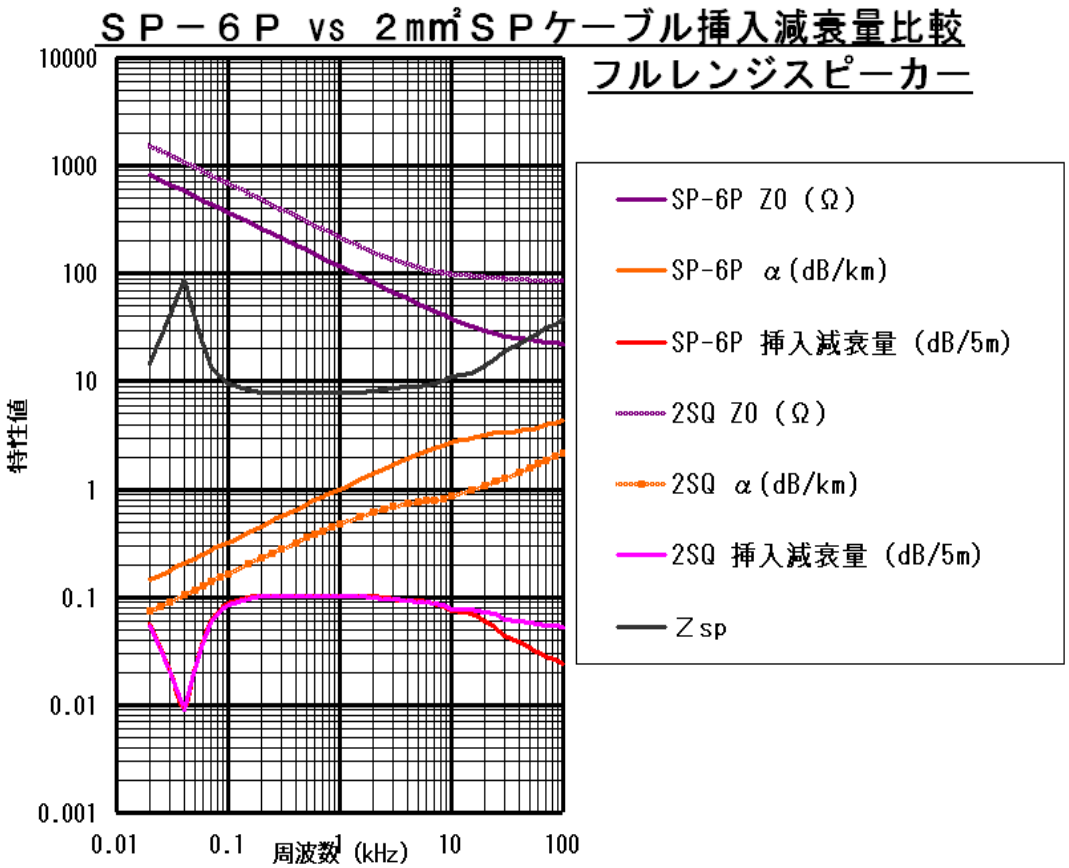
「図２」のＲ，Ｌ，Ｃ、Ｚｏ、α　を夫々のケーブルで求めると「図４」の如くになる。特徴的な特性は２ｍｍ^{2}ケーブルでは１０ｋＨｚから表皮効果の影響で導体抵抗が上昇し始める。ＳＰ－６Ｐは６対をパラレルに使用しているのでＺｏが小さい、等。



「図４」ＳＰ－６Ｐと２ｍ㎟ＳＰケーブル特性比較

２）フルレンジスピーカーにケーブルを配線した場合の挿入減衰量（α ｉ）計算

「図３」の終端Ｚｒをフルレンジスピーカーとして挿入減衰量（α ｉ）を計算した結果を「図５」に示す。この場合の電源側Ｚｓはアンプの出力抵抗としてＺａｍｐ＝８０ｍΩ、ケーブル長は５ｍとする。



「図５」 ＳＰ－６Ｐと２ｍ㎟ＳＰケーブル挿入減衰量比較

「解説」

各カーブはグラルの上から次の特性を示す；

紫色（ドット状線）；２ｍｍ^{2}ケーブルの特性インピーダンス　（Ω）

紫色（実線）　　；ＳＰ－６Ｐケーブルの特性インピーダンス　（Ω）

黒色（実線）　　；フルレンジスピーカーのインピーダンス特性　（Ω）

橙色（実線）　　；ＳＰ－６Ｐケーブルの減衰量　（ｄＢ／ｋｍ）

橙色（ドット状線）；２ｍｍ^{2}ケーブルの減衰量　（ｄＢ／ｋｍ）

桃色（実線）　　；２ｍｍ^{2}ケーブルの挿入減衰量　（ｄＢ／５ｍ）

赤色（実線）　　；ＳＰ－６Ｐケーブルの挿入減衰量　（ｄＢ／５ｍ）

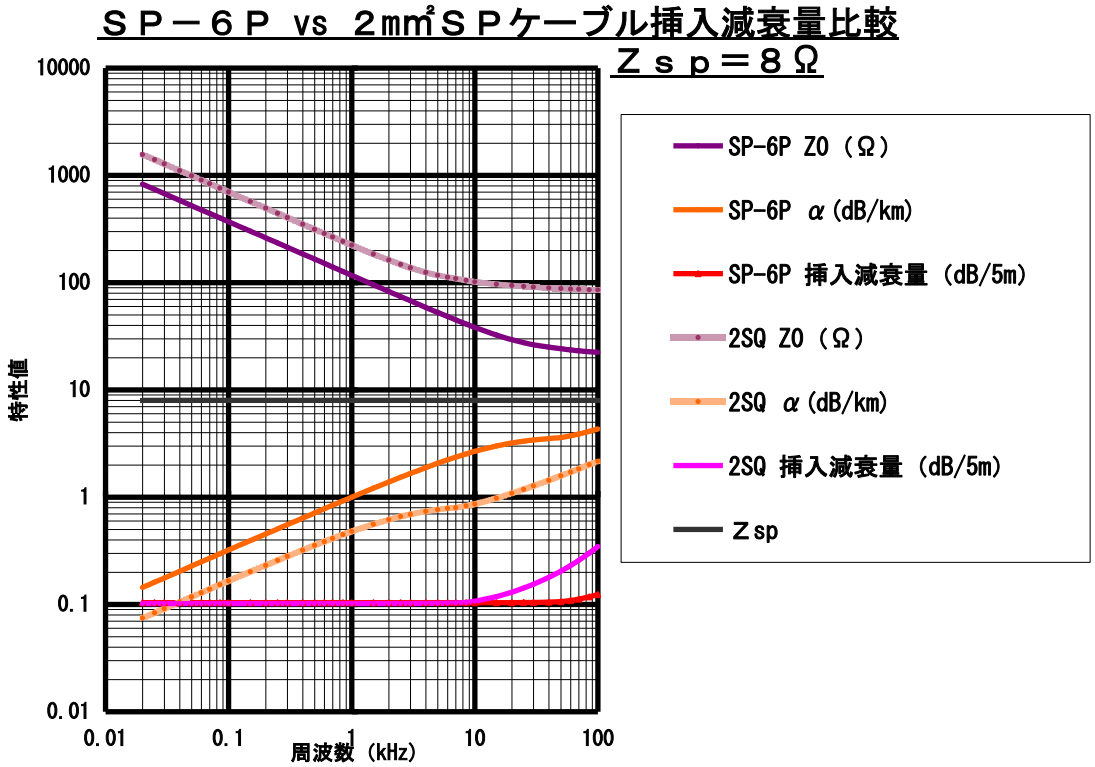
ＨＰでも述べているが、ケーブルの音質を語る場合には、２０Ｈｚから１００ｋＨｚ程度までの帯域で、ケーブルの特性がどの様な挙動を示すかを調べる必要がある。

ケーブルの挿入減衰量（α ｉ）の値は５ｍ長で０．１ｄＢ程度で、両端末が特性インピーダンスで終端された場合のケーブルの減衰量（橙色）と比べると２桁程度大きな値となり、音の差として聞き分けが出来るでしょう。挿入減衰量カーブの形は概ねスピーカーのインピ

ーダンスカーブを反転させた形と言える。これはケーブルとスピーカーの特性インピーダンスのインピーダンス整合が係わっていると見ることが出来る。ＳＰ－６Ｐは３０ｋＨｚ付近でスピーカーのインピーダンスと交差しており、この帯域でのエネルギー伝送は良好になると考えられるが、案の定、ＳＰ－６Ｐの挿入減衰量（赤色線）は２ｍｍ²ケーブルの挿入減衰量（桃色線）を下回っている。このデーターによると、ＳＰ－６Ｐは高周波域、高調波の減衰が少ないことを示し、このことは広帯域で分解能の良い音質が得られるとの音質評価と一致する。

「図５」から、ケーブルの挿入減衰量（α ｉ）のカーブがスピーカーのインピーダンス特性にかなり支配されていることが分かった。このことは同じケーブルを使用しても、使用するスピーカーシステムのインピーダンス特性により音質がかなり変わる可能性があることを暗示している。

一方、ケーブルを設計する立場からすれば、ケーブル自体の持っている特性を把握する必要がある。そこで、スピーカーシステムのインピーダンスを一定にすれば、ケーブル単体の比較が明瞭になると考えて、全周波数帯域でＺｓｐ＝８Ωとして試算をしてみた。その結果を「図６」に示す。



「図６」ＳＰ－６Ｐと２ｍ㎡ＳＰケーブル挿入減衰量比較；全帯域Ｚｓｐ＝８Ω

ＳＰ－６Ｐの挿入減衰量（赤色線）は１００ｋＨｚまでほぼ横一線で一定であるのに対し、２ｍｍ²ケーブルの挿入減衰量（桃色線）は１０ｋＨｚ付近から上昇し、減衰が大きくなっていることが分かる。即ち、ＳＰ－６Ｐは高音域まで延びた、高解像度の音質を得られることが立証出来た。

更にここに示した３点のグラフ（「図４」～「図６」）を詳細に眺めると、赤色線及び桃色線カーブの形状は「図４」の導体抵抗の周波数特性（茶色線及び茶色のドット状線）と酷似している。即ち、広帯域ケーブルを設計する上では表皮効果による導体抵抗増加を如何にコントロールするかが大切であることを物語っている。又、表皮効果の影響はケーブルの減衰量カーブにも現れているので、このカーブの形状をよく検証することが良いケーブルを造る手段と言える。（減衰量の値そのものが問題ではない。）

今回の計算に使用した２ｍｍ^{2}ケーブルより太い導体を使用すると、より低い周波数から表皮効果の影響が現れるので、一般的には太い導体のケーブルは低音強調型と言う事が出来る。又、ここで示された様に、表皮効果が発現する周波数以上ではケーブルの減衰量が増加することは、正にケーブルが低域濾波器の役割をすることに他ならず、ＨＰで述べている「ケーブルは低域濾波器だ！」と言う論旨が正しいことが証明された。

４．今後の課題

今回の解析に用いた定数は、私はケーブルの設計技術者であるので、ケーブルに関しては、Ｒ，Ｌ，Ｇ，Ｃの回路定数からなる特性インピーダンスを（２）式に当てはめ複素数として計算したが、アンプ、スピーカーシステムに関して私は門外漢であり、インピーダンスの絶対値で計算している。アンプ、スピーカーシステム共に、Ｚａｍｐ、Ｚｓｐは本来、キャパシタンス、インダクタンスの成分を持っているので複素数として示されるはずである。しかし残念ながら現状はこれらデーターが公開されていない。今後これらのデーターを入手し、更に突っ込んだ解析をすることが課題である。

「図５」や「図６」の特性は電気的特性からの検証であるが、音楽は人間の耳で聞いて好ましいか否かで最終判断がされる。耳の「等ラウドネス曲線」等も加味して、電気的にどの様なカーブを示すと好ましいと評価されるかという事を知るのも大きな課題でしょう。